

УДК 621.315.592

© 1992 г. Малеваная О. Н., Шмаева Л. А., Лебедев А. И., Зломанов В. П.

ФЕРРОМАГНЕТИЗМ И СОСТОЯНИЕ СПИНОВОГО СТЕКЛА  
В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ  $(\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x)_{1-y}\text{Te}_y$ 

Изучение магнитных полупроводников в настоящее время приобретает все больший интерес. Среди полупроводников группы  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  твердые растворы системы  $\text{GeTe} - \text{MnTe}$  обладают уникальной способностью перехода в ферромагнитное состояние выше 77 К, обусловленного взаимодействием между магнитными моментами атомов Mn через свободные дырки (РККИ-взаимодействие) [1, 2].

Целью настоящей работы было получение твердого раствора  $(\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x)_{1-y}\text{Te}_y$  различного состава, изучение влияния состава на магнитную структуру материала. В связи с существенной зависимостью величины РККИ-взаимодействия от концентрации дырок исследовано воздействие отклонения от стехиометрии на магнитные свойства образцов.

Теллуриды германия и марганца образуют при высокой температуре непрерывный ряд твердых растворов со структурой типа NaCl. В твердом растворе с концентрацией MnTe менее 12 мол. % при температуре ниже 630 К происходит сегнетоэлектрический фазовый переход из кубической в ромбоэдрическую фазу. С ростом содержания MnTe температура этого перехода закономерно понижается, и образцы с  $x > 0,12$  при 300 К имеют только кубическую структуру. В области составов  $0,52 < x < 0,94$  при 300 К имеется двухфазная область с кубической и гексагональной структурами [3].

Образцы синтезировали из Ge, Te и MnTe в кварцевых ампулах сплавлением при 1200 К и последующим отжигом при 950 К в течение 72 ч. Состав сплавов отвечал формуле  $(\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x)_{1-y}\text{Te}_y$  ( $0,05 \leq x \leq 0,5$ ;  $0,49 \leq y \leq 0,525$ ). Использование двухфазных сплавов за пределами границ области гомогенности твердого раствора позволяло провести магнитные измерения на образцах, состав которых точно соответствовал границам области гомогенности со стороны металла и теллура, поскольку магнитные измерения не чувствительны к наличию немагнитной второй фазы.

По данным рентгенофазового анализа, таким образом были получены однофазные образцы ромбоэдрической (при малых  $x$ ) и кубической модификаций, а также содержащие в качестве второй фазы небольшие количества Ge или MnTe.

Измерения эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{эфф}}$  проводили в интервале температур 4–300 К по изменению частоты колебательного контура ( $f \approx 100$  кГц), в катушку индуктивности которого в качестве сердечника помещался образец. Для уменьшения скин-эффекта образцы растирали в порошок с размером зерна, намного меньшим толщины скин-слоя.

На всех образцах при понижении температуры наблюдалось резкое возрастание  $\mu_{\text{эфф}}$ , характерное для ферромагнитного фазового перехода. Измерения зависимостей  $\mu_{\text{эфф}}(T)$ , проведенные в процессе нагревания и охлаждения образцов, не обнаружили заметного гистерезиса, что свидетельствует о том, что ферромагнитный фазовый переход в GeMnTe является переходом II рода.

Зависимость температуры Кюри ( $T_c$ ) от концентрации MnTe для составов, отвечающих границам области гомогенности, показана на рис. 1. Видно, что при отклонении от стехиометрии в сторону избытка теллура  $T_c$  возрастает. При фиксированном  $y$  с увеличением содержания MnTe от 5 до 30–40 мол. % наблюдается постепенное повышение  $T_c$ , далее происходит ее стабилизация. Некоторый разброс данных, по-видимому, связан с трудно контролируруемыми изменениями состава сплавов из-за наличия небольших выделений второй фазы. Аналогичное насыщение роста  $T_c$  при увеличении содержания MnTe в образцах системы GeTe – MnTe ранее наблюдалось в [2].

В данной работе на образцах твердого раствора с содержанием MnTe более 30 мол. % на температурных зависимостях  $\mu_{\text{эфф}}(T)$  обнаружен резкий спад в области 20–40 К (рис. 2), температура появления и величина эффекта которого возрастают с увеличением концентрации марганца. Такой характер зависимости ниже температуры ферромагнитного фазового перехода может, по нашему мнению, свидетельствовать о переходе ферромагнитной фазы в состояние возвратного спинового стекла. Подобное поведение характерно для многих «разбавленных» магнитных систем с конкурирующими взаимодействиями [4]. Однако в отличие от классических систем такой переход наблюдается не в области малых, а в области высоких концентраций

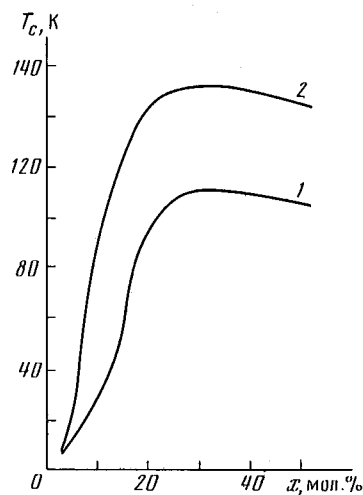


Рис. 1

Рис. 1. Зависимости температуры Кюри от концентрации теллурида марганца в твердом растворе для образцов, отвечающих границам области гомогенности со стороны металла (1) и халькогена (2)

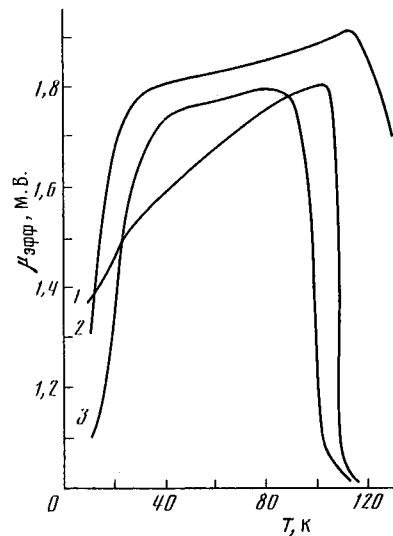


Рис. 2

Рис. 2. Температурные зависимости эффективной магнитной проницаемости для  $(\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x)_{0,31}\text{Te}_{0,49}$ , где  $x=0,30$  (1);  $0,40$  (2);  $0,50$  (3)

магнитной примеси. Мы считаем, что причиной возникновения возвратного спинового стекла при высоких концентрациях магнитной примеси является конкуренция между дальнедействующим, в основном ферромагнитным, РККИ-взаимодействием и короткодействующим антиферромагнитным взаимодействием атомов марганца в соседних узлах.

Полученные зависимости температуры ферромагнитного фазового перехода от состава твердого раствора  $(\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x)_{1-y}\text{Te}_y$  и отклонения от стехиометрии делают возможным направленный синтез ферромагнитного полупроводникового материала с заданной магнитной структурой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rodot M., Levis J., Rodot H., Villers G. et al. Magnetic interaction between Mn spins diluted in GeTe // J. Phys. Soc. Jap. 1966. V. 21. Suppl. P. 627-630.
2. Cochrane R. W., Plischke M., Ström-Olsen J. O. Magnetization studies of  $(\text{GeTe})_{1-x} \cdot (\text{MnTe})_x$  pseudobinary alloys // Phys. Rev. B. 1974. V. 9. № 7. P. 3013-3021.
3. Johnston W. D., Sestrich D. E. The Mn-Te phase diagram // J. Inorg. and Nucl. Chem. 1961. V. 19. P. 229-236.
4. Гинзбург С. Л. Необратимые явления в спиновых стеклах. М.: Наука, 1989. 152 с.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова